Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 76 (1985)

Heft: 4

Artikel: Überspannungsschutz von Mittelspannungskabeln

Autor: Rudolph, R. / Mayer, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904562

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Überspannungsschutz von Mittelspannungskabeln

R. Rudolph, A. Mayer

Der Beitrag geht auf die Vorgänge in Kabeln vor allem bei Überspannungsbeanspruchung durch Blitzeinschlag ein und beschreibt Schutzkonzepte für Kabel sowie für Transformatoren mit direkt eingeführten Kabeln. Als weiteres Spezialgebiet des Kabelschutzes werden Möglichkeiten des Kabelmantelschutzes dargestellt.

L'article traite de ce qui se passe dans les câbles en cas de surtension provoquée principalement par l'impact de la foudre et il décrit les concepts de protection pour câbles ainsi que pour transformateurs avec arrivée directe de câbles. Il présente également, en tant qu'autre domaine spécial de la protection des câbles, les possibilités de protection des blindages de câble.

1. Herkunft und Einteilung von Überspannungen

Wenn man sich mit Überspannungsschutz befasst, so ist es zweckmässig, sich zuerst die verschiedenen Arten von Überspannungen vor Augen zu führen. Figur 1 teilt die in Mittel- und Hochspannungsnetzen auftretenden Überspannungen nach ihrer Herkunft ein und stellt ihre Amplitude über ihrer jeweiligen Dauer dar. Die Amplitude ist im Massstab «per unit» wiedergegeben, wobei 1 p.u. – wie in der Isolationskoordination üblich – dem maximalen Scheitelwert der Phasen-Erdspannung eines Drehstromsystems entspricht.

Atmosphärische oder Blitzüberspannungen stellen die extremste Bedrohung der Übertragungs- und Verteilsysteme dar. Die Blitzparameter sind heute schon recht gut bekannt. Die umfangreichen Untersuchungen von Prof. Berger im Forschungsinstitut auf dem San Salvatore [1], zusammen mit den weltweit gesammelten Daten, wie sie im CIGRE-Bericht 33-06 (1980) zusammengetragen sind [2], geben genügend Unterlagen zur Dimensionierung des Blitzschutzes der Netze. Es muss jedoch darauf verwiesen werden, dass es sich hier um statistische Daten handelt und man daher nur mit einer statistischen Wahrscheinlichkeit rechnen kann.

So ist, weltweit betrachtet, die Wahrscheinlichkeit, dass ein Blitzstrom 37 kA erreicht, immerhin 50%, während 2% aller Blitze mehr als 100 kA führen.

Beim Schutz von Mittelspannungsnetzen sind zwei Arten von Blitzüberspannungen zu betrachten: *Direkte Blitzeinschläge* in ein Leiterseil lösen Wanderwellen aus, deren Amplitude nur durch die Überschlagspannung der Leitungsisolatoren begrenzt wird. Bei den geringen Phasendistanzen der Mittelspannungsnetze ist damit zu rechnen, dass ein Einschlag alle drei Leiterseile trifft. Bei nicht geerdeten Traversen von Mittelspannungsfreileitungen können die drei Leiterseile sehr hohe Spannungen gegen Erde annehmen.

Von *indirekter Blitzeinwirkung* spricht man, wenn Überspannungen im Leiterseil von Blitzentladungen

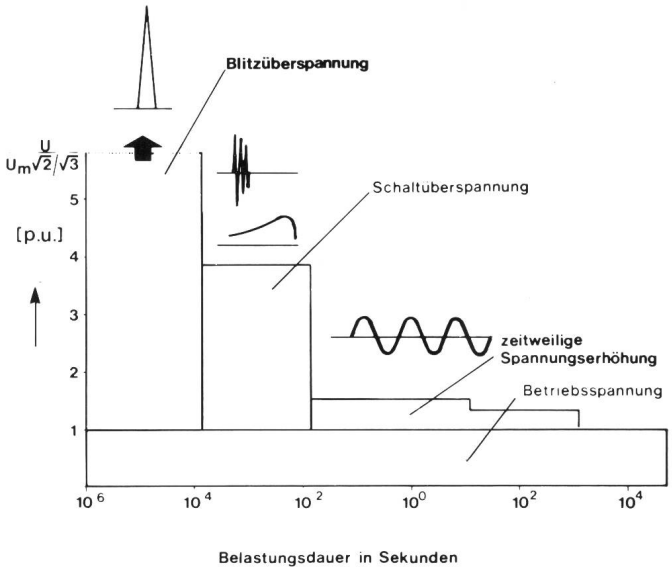


Fig. 1 Dauer und Höhe *U* der Überspannungsbeanspruchung in Hochspannungsnetzen

Adresse der Autoren

René Rudolph und *Albert Mayer*, BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie, Werk Oerlikon, Abt. AVH, 8050 Zürich

zwischen den Wolken oder von Blitzeinschlägen in der Nähe der Leitung induziert werden. Elektrisch geladene Gewitterwolken influenzieren in der Leitung eine Gegenladung. Diese erzeugt in der Leitung eine Überspannung, sobald das elektrische Feld im Verlauf einer Blitzentladung zwischen den Wolken zusammenbricht. Bei einem Blitzeinschlag gegen Erde in Leitungsnähe induziert der schnelle Aufbau des magnetischen Feldes ebenfalls Überspannungen im Leiterseil. Solche durch indirekte Blitzeinwirkung ausgelöste Überspannungen können Werte bis zu 200 kV erreichen. Daraus lässt sich folgern, dass sie in erster Linie für Mittel- und Niederspannungsnetze von Bedeutung sind, und zwar um so mehr, je niedriger die Betriebsspannung des Netzes ist.

Die Blitzstatistiken beweisen, dass für Mitteleuropa bei isolierten Holzmastenleitungen die bisher empfohlenen 10-kA-Überspannungsableiter nötig sind, während bei geerdeten Masten, etwa bei Masttrafos, die Kategorie der 5-kA-Verteilspannungsableiter ausreicht.

Schaltüberspannungen treten als Ausgleichsvorgänge bei jeder Netzzustandsänderung auf. Wird ein Stromkreis von der speisenden Spannung getrennt, so geht sowohl auf der Lastseite als auch auf der Speiseseite des Schalters die Spannung nicht schlagartig auf Null bzw. auf die Leerlaufspannung. Der Übergang erfolgt vielmehr in Form einer Schwingung. Die Frequenz und Dauer einer solchen Überspannungsschwingung hängt stark von den Netzparametern ab. Es ist mit Anstiegszeiten von einigen 10 bis einigen 100 µs zu rechnen. Die Amplituden können 4 p.u. erreichen.

Unter temporären Überspannungen sind netzfrequente Überspannungen zu verstehen, deren Dauer Sekunden bis Stunden betragen kann. Entsteht z.B. in einem isolierten Dreiphasensystem ein einphasiger Erdschluss, so gehen die nicht fehlerbehafteten Phasenleiter auf verkettete Spannung gegen Erde; sie erfahren also eine temporäre Überspannung von $\sqrt{3}$ p.u.

2. Überspannungswellen in Kabeln

Wie verhält sich ein Kabel gegenüber einer Überspannungswelle? In Figur 2 ist dazu ein sehr strenger, aber einfach zu überblickender Fall dargestellt. In eine Freileitung mit dem Wellenwiderstand Z = 450 Ohm schlägt ein Blitz ein, der eine Wanderwelle U mit extrem steiler Front erzeugt, die zudem einen sehr langen Rücken hat. Diese Rechteckwelle läuft mit der Geschwindigkeit von 300 m/µs in Richtung Kabel. Das Mittelspannungskabel habe einen Wellenwiderstand von 30 Ohm und die Laufgeschwindigkeit der Welle im Kabel betrage 150 m/µs.

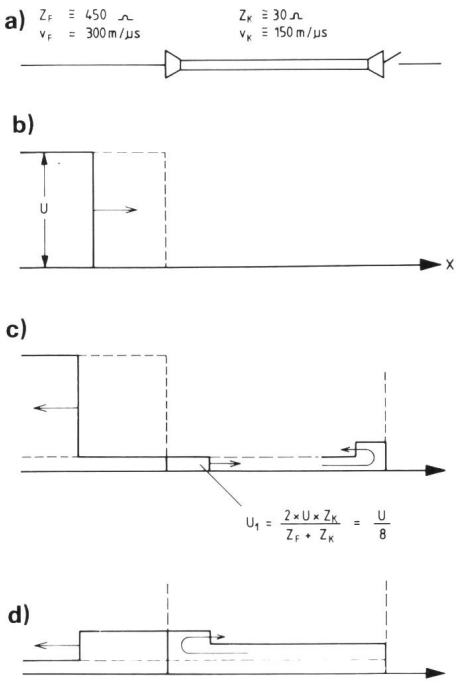


Fig. 2 Reflexion einer Wanderwelle (Rechteckwelle) mit der Amplitude *U* am Übergang Freileitung–Kabel

a) Typische Werte für Wellenwiderstände Z und Laufgeschwindigkeit v
b) Rechteckwelle
c) Ein Teil der Welle wird reflektiert, und $U_1 = U/8$ zieht in das Kabel ein, um am Ende wieder reflektiert zu werden
d) Die bereits am offenen Ende reflektierte Welle wird am Anfang wieder reflektiert usw.

Am Übergang Freileitung–Kabel, also beim Kabelendverschluss, tritt nun wegen der unterschiedlichen Wellenwiderstände eine Reflexion auf. Ein Teil der ankommenden Welle zieht in das Kabel ein, der grössere Teil wird auf die Leitung reflektiert.

Bei den angegebenen Verhältnissen läuft eine Welle mit der Amplitude von $U/8$ durch das Kabel und wird am Kabelende reflektiert, beim offenen Kabel also verdoppelt. Die nun erhöhte Welle kehrt zum Kabeleingang zurück, wird abermals reflektiert und gibt einen Teil der Energie an die Freileitung ab. Es ist leicht vorstellbar, wie diese hin- und herlaufende Welle im Kabel die Spannung stufenweise bis zum Endwert aufbaut. Der zeitliche Verlauf dieses Spannungsaufbaues folgt der Funktion $(1-e^{-t/\tau})$, deren Zeitkonstanten τ in den Figuren 3 und 4 angegeben wird. Bei einem Kabel, das in den Zug einer Freileitung eingebaut ist (Fig. 3), etwa bei der Unterquerung einer Nationalstrasse, beträgt der Endwert der Kabelspannung gerade U. Dies bedeutet, dass die Spannungswelle hinter dem Kabel gerade so gross ist wie die einlaufende Welle. Bei einem am Ende offenen Kabel (Fig. 4), etwa bei einer Schaltstation, die über ein Kabel mit einer Freileitung verbunden ist, ist der Endwert doppelt so gross wie die von der Freileitung ankommende Spannungswelle U.

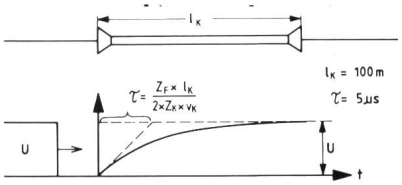


Fig. 3 Zeitlicher Aufbau der Spannung im Kabel beim Auftreten einer Rechteckwelle. Kabel im Zuge einer Freileitung; bei einer Kabellänge l_k vom 100 m erhält man eine Zeitkonstante τ = 5

3. Überspannungsschutz von Kabeln

Blitzüberspannungen, und auf diese sollen die nachfolgenden Ausführungen beschränkt sein, werden auf Freileitungen in der Regel auf die Überschlagsspannungen der Leitungsisolatoren begrenzt. Man muss also davon ausgehen, dass der Scheitelwert der in Richtung Kabel laufenden Überspannungswelle gleich der Überschlagsspannung der Leitungsisolatoren ist. Es ist zwar vorstellbar, dass die Kabelisolation dieser Beanspruchung noch standhält, die Kabelendverschlüsse sind aber auf jeden Fall gefährdet, dies um so mehr, wenn das Kabel an einem Ende offen ist. Hier kann das Kabel, wie im vorhergehenden Abschnitt gezeigt, auf die doppelte Spannung aufgeladen werden.

Kabeldurchschläge führen zu unangenehmen Störungen und erfordern

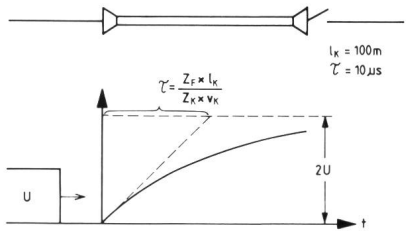


Fig. 4 Wie Figur 3, aber Kabel am Ende offen. Die Zeitkonstante τ wird jetzt zweimal so gross wie in Figur 3

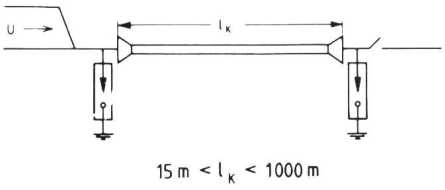


Fig. 5 Mittelspannungskabel mit einer Länge zwischen 15 m und 1000 m sind an jedem Ende mit einem Ableiter zu schützen

aufwendige Reparaturarbeiten. Daher sind Kabel wie Stationsmaterial zu behandeln und an beiden Enden mit Überspannungsableitern zu schützen (Fig. 5).

Bei den bisherigen Überlegungen wurde die von der Leitung her in Richtung Kabel laufende Welle als Rechteckwelle angenommen. Diese theoretische Annahme ist für die Praxis zu hart. Nimmt man aber eine realistische Anstiegszeit und Rückenhalbwertszeit für die Überspannungswelle auf der Freileitung an, so kommt man zum Schluss, dass bei sehr kurzen und bei sehr langen Kabeln der Überspannungsschutz durch Ableiter vereinfacht werden kann. Man benötigt dann nur einen Ableitersatz an einem der beiden Kabelenden.

Die einfache Laufzeit einer Welle im Kabel ist l_k/v_k. Die Anstiegszeit einer Überspannungswelle auf der Freileitung und damit am Ableiter neben dem Kabelendverschluss sei nach Figur 6a T. Ist diese Anstiegszeit nicht kürzer als viermal l_k/v_k, so ist die Spannung am Kabelende trotz der mehrmaligen Reflexionen praktisch gleich hoch wie am Kabelanfang [3]. Die Spannung am Kabelende steigt also höchstens auf das Schutzniveau des Ableiters am Kabelanfang. Der Ableitersatz auf der anderen Seite des Kabels trägt also zum Schutz nichts bei. Nimmt man eine Anstiegszeit von 0,4 µs, die den Verhältnissen bei Mittelspannungsnetzen entsprechen dürfte, so ist nach Figur 6a ein Kabel von höchstens 15 m Länge durch einen Ableitersatz ausreichend geschützt.

Blitzströme steigen sehr rasch an, erreichen den Scheitelwert und gehen anschliessend mehr oder weniger rasch gegen Null. Die elektrische Ladung eines Blitzes ist also auf jeden Fall begrenzt und ebenso der Anteil der Ladung, der von einer Freileitung eingefangen werden kann. Auf der anderen Seite ist ein Kabel als Kapazität zwischen Leiter und Erde zu betrachten, die proportional zur Kabellänge l_k zunimmt. Ein langes Kabel mit einer grossen Kapazität wird nun von einer bestimmten Blitzladung weniger hoch aufgeladen als ein kurzes Kabel mit kleiner Kapazität.

Es ist daher anzunehmen, dass eine kritische Kabellänge l_K^* existiert, ab der das ungeschützte Kabelende nur noch auf die einfache Spannung des mit einem Ableiter geschützten Endes aufgeladen wird. Diese kritische Länge l_K^* wird natürlich davon abhängen, wie rasch der Blitzstrom wieder abklingt bzw. wie lang die Rückenhalbwertszeit T_2 der einlaufenden Überspannungswelle in Figur 6b ist. Unter der vereinfachenden Annahme, dass die Spannung im Rücken der Überspannungswelle linear abfällt, wurde in [3] die Beziehung abgeleitet

$$l_K^* \geq \frac{T_2 \cdot Z_k \cdot v_K}{3\, Z_F}$$

Solange diese Beziehung gilt, ist die Spannung an beiden Kabelenden praktisch gleich gross.

Für ein Kabel erhält man mit der realistischen Annahme von T_2 = 300 µs eine kritische Kabellänge von 1000 m. Das heisst, dass bei allen Kabeln mit einer Länge >1000 m ein Ableiterschutz an einem Kabelende ausreicht. Bei elektrisch parallel geführten Kabeln nimmt die kritische Länge entsprechend ab, was besonders bei ausgedehnten Kabelnetzen von Bedeutung ist.

Zusammenfassend ergibt sich für Kabel folgendes Schutzkonzept:

- Ableiterschutz nur an einem Kabelende für Kabellängen <15 m oder >1000 m.
- Ableiterschutz an beiden Kabelenden nach Figur 5 für alle Kabellängen zwischen 15 m und 1000 m.

4. Schutz von Transformatoren mit direkt eingeführten Kabeln

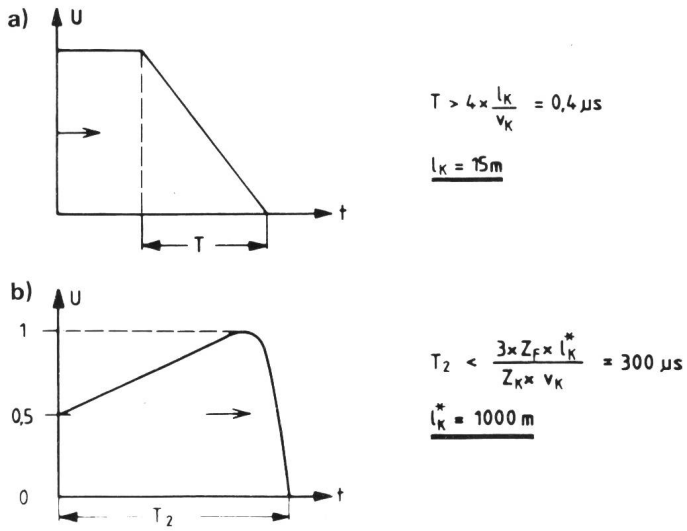
Folgender Spezialfall hat in Mittel- und Hochspannungsnetzen besonders in der Schweiz eine gewisse Bedeutung: das direkt im Ölraum eines Transformators angeschlossene Kabel. Kann man unter diesen Verhältnissen den Transformator noch ausreichend schützen?

Diese Frage ist für die Hochspannungsnetze von erheblicher Bedeutung. In den Kavernenkraftwerken der Alpen müssen Maschinentransformatoren grosser Leistung in den Kavernen aufgestellt werden, und Hochspannungskabel verbinden sie mit den Freileitungsnetzen ausserhalb des Berges. In Mittelspannungsnetzen wird das direkt in den Transformator eingeführte Kabel zwar weniger häufig verwendet, aber es ist in ausgedehnten Industrieanlagen sowie bei unterirdischen Spezialanlagen eine wirtschaftliche Lösung mit vielen Vorteilen:

- Raumsparende Anordnung (Kavernen, unterirdische Stationen in Stadtnetzen)
- Einsparung einer Durchführung am Transformator
- Optimaler Berührungsschutz bei den Zuleitungen
- Energietransport mit Hochspannung bis zum Endverbraucher möglich

Der Nachteil dieser Anordnung ist aber, dass dabei die Ableiter nicht mehr unmittelbar an den Transformatorklemmen angeschlossen werden können. Der Überspannungsschutz kann jetzt nur noch am Übergang von der Freileitung zum Kabel angebracht werden. Ein Transformator hat einen

Fig. 6 Kritische Längen für ein Kabel mit einem Ableiterschutz an einem Kabelende



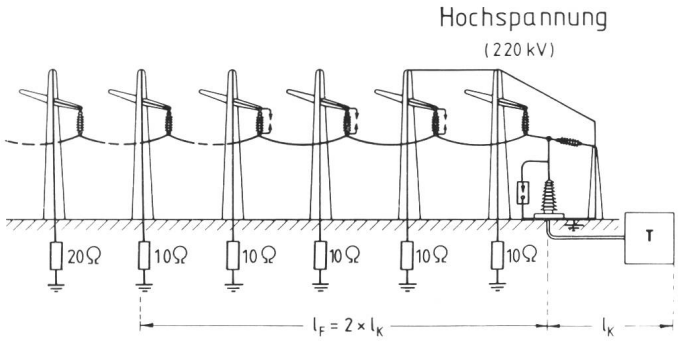


Fig. 7
Überspannungsschutzkonzept für einen Transformator *T* in einer Kaverne, bei dem ein Hochspannungskabel direkt im Ölraum angeschlossen ist

Wellenwiderstand in der Grössenordnung von 1000 Ohm. Man hat es also praktisch mit einem offenen Kabelende zu tun.

4.1 Schutzkonzept für Hochspannungsnetze

Das Schutzkonzept für die Hochspannungsnetze wurde schrittweise erarbeitet, wie die besonders von Schweizer Autoren veröffentlichten Arbeiten zeigen [3], [4], [5], [6], [7], [8].

Das Ergebnis der Untersuchungen ist in Figur 7 zusammengefasst. Folgende Massnahmen sind bei einem Hochspannungsnetz erforderlich:

a) Ein Überspannungsableiter mit möglichst tiefem Schutzniveau ist nahe beim Kabelendverschluss zu installieren.
b) Der Abspannmast vor der Anlage darf nicht höher als 20 m sein. Seine Erdung ist direkt mit dem Erdanschluss des Ableiters und des Kabelendverschlusses zu verbinden.
c) Für eine Länge, die zweimal der Kabellänge entspricht, müssen alle Leitungsmasten einen Erdungswiderstand von weniger als 10 Ohm haben. Vom Abspannmast bis zum ersten Leitungsmast müssen Doppelerdseile verwendet werden.
d) Die Isolatoren der Leitungsmasten Nr. 2, 3 und 4, von der Kabelseite her gezählt, müssen mit Funkenstrecken überbrückt sein. Ihre Stossansprechspannung sollte mit der Nennspannung der Hochspannungsleitung koordiniert werden.

Mit diesem Paket von Massnahmen ist es möglich, eine Anlage selbst bei extremen Blitzstössen von 100 kA bei 1 µs Frontanstiegszeit noch zu schützen.

In [7] wurden die Berechnungen für ein 245-kV-Netz beschrieben. Der Ableiter in Figur 7 hat ein Schutzniveau von 600 kV. Die Pegelfunkenstrecken sind auf eine Überschlagsdistanz 1050 mm eingestellt und zünden bei 1500-kV-Stoss.

Der weitaus häufigste Fall ist der entfernte Blitzeinschlag in das Leiterseil. Bei hohen einlaufenden Spannungen schützen die Funkenstrecken, bei kleineren Spannungen schützt der Ableiter. Auf diese Weise bleibt die Überspannung am Transformator auf 700 kV begrenzt.

Bei nahen Blitzeinschlägen in die Leitungsmasten oder in das Leiterseil ist vor allem wichtig, dass die Erdungswiderstände der Leitungsmasten kleiner als 10 Ohm sind und dass die Höhe des Abspannmastes nicht mehr als 20 m beträgt. Unter diesen Umständen gelingt es, die Überspannung beim Transformator unter 700 kV zu halten. Ein Blitzeinschlag in das Phasenseil der ersten Spannweite würde aber auf jeden Fall zur Zerstörung des Transformators führen. Deshalb müssen die Phasenleiter mit zwei Erdseilen, mit möglichst grosser Entfernung über dem Phasenseil angeordnet, vor Blitzeinschlägen geschützt werden.

4.2 Schutzkonzept für Mittelspannungsnetze

Es ist nun zu untersuchen, inwieweit die Modellanordnung von Figur 7 auch für Mittelspannungsnetze übernommen werden kann. Dabei sind folgende Unterschiede gegenüber den Übertragungsnetzen zu berücksichtigen:

- Der Sternpunkt ist meist nicht geerdet. Dies führt zu einem höheren Schutzniveau der Ableiter.
- Die Erdungswiderstände der Masten sind relativ zur Netzspannung höher.
- Grosse Blitzströme teilen sich meist auf die drei Phasenleiter auf, so dass pro Phase mit einem kleineren Blitzstrom gerechnet werden darf.

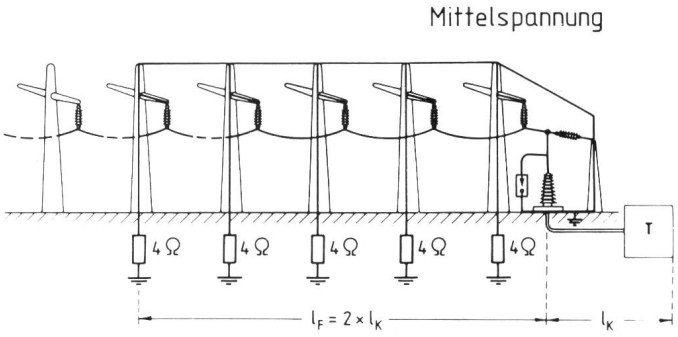
Dies führt zum Lösungsvorschlag, der in Figur 8 skizziert ist. Ein Ableiter mit tiefem Schutzniveau, z.B. mit strombegrenzenden Funkenstrecken oder Metalloxid-Technologie, ist direkt am Kabelendverschluss zu montieren. Sein Erdanschluss ist mit der Kabelerde zu verbinden. Die Freileitung ist über eine Distanz, die zweimal der Kabellänge entspricht, gegen direkte Blitzeinschläge zu schützen. Das Erdseil und die Masttraversen sollen direkt durch eine Erdleitung am Mast mit Erde verbunden werden. Der Erdungswiderstand für die mit dem Erdseil überspannten Masten darf 4 Ohm nicht übersteigen.

Bei diesem Konzept führen hohe einlaufende Überspannungen zu einem Überschlag über die Leitungsisolatoren. Sie werden über die Leitungsmaste gefahrlos nach Erde abgeleitet. Damit wird erreicht, dass nur noch Überspannungswellen mit einer kleineren Amplitude als die Überspannung der Leitungsisolatoren auf den Kabelendverschluss zukommen. – Ein Direkteinschlag in das Leiterseil in Kabelnähe wird durch das Erdseil verhindert.

Dieser Lösungsvorschlag gewährleistet nach [3], dass die Spannungsbeanspruchung des Transformators höchstens 30% über dem Ableiterschutzniveau liegt. Damit wird auch der Sicherheitsabstand von 25% bei Blitzbeanspruchung, den IEC vorschlägt, eingehalten. Die entsprechenden Daten für ein 24-kV-Netz sind:

Höchste Betriebsspannung	24 kV
Ableiterschutzniveau	etwa 60 kV
Höchstmögliche Überspannung am Transformator 1,3×60 kV	78 kV
BIL des Transformators	125 kV
Sicherheitsabstand (125–78)/78	60%
Nach IEC gefordert	25%

Fig. 8
Überspannungsschutzkonzept von Figur 7 übertragen auf die Verhältnisse bei Mittelspannung



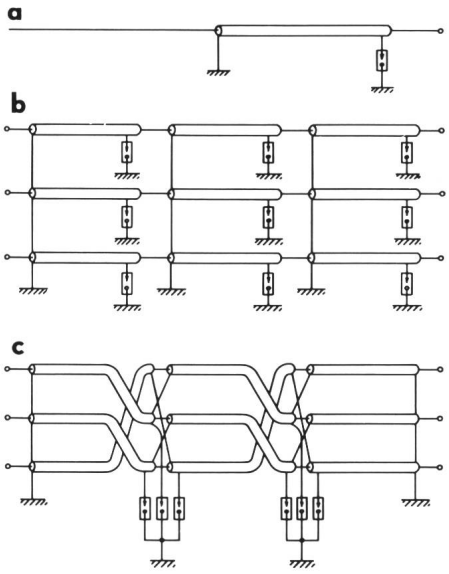


Fig. 9 Kabelmantelschutz bei Einleiterkabeln

a) Kabelmantel an einem Ende geerdet, am anderen Ende mit Überspannungsableiter versehen
b) Bei grösseren Kabellängen werden die Kabelmäntel abschnittweise geschützt
c) Beim Auskreuzen der Kabel (Cross bonding) werden die Ableiter an den Kreuzungsstellen montiert

5. Kabelmantelschutz

Ein weiteres Spezialgebiet des Kabelschutzes, der Kabelmantelschutz, soll diese Betrachtungen abrunden. Hochspannungskabel werden gewöhnlich mit einem Metallmantel versehen, der seinerseits wieder nach aussen z.B. gegen die umgebende Erde mit einer Isolation versehen ist. Diese äussere Isolation übernimmt einerseits einen gewissen mechanischen Schutz des Kabels beim Verlegen, sie verhindert aber auch eine Korrosion des Kabelmantels.

Der im Kabelleiter fliessende Nennstrom induziert nun im Kabelmantel eine Spannung. Werden alle drei Leiter eines Dreiphasenkabels von einem gemeinsamen Mantel umgeben, so heben sich die von den drei Phasenströmen im Mantel induzierten Spannungen fast auf.

Beim Einleiterkabel sind jedoch die induzierten Spannungen beträchtlich. Werden beide Mantelenden geerdet, so erwärmen die fliessenden Mantelströme das Kabel im Betrieb zusätzlich. Es kann daher aus thermischen Gründen nur mit einem erheblich reduzierten Nennstrom betrieben werden. Deshalb ist es vorteilhaft, den Kabelmantel eines Einleiterkabels nur an einer Seite zu erden. In diesem Fall sind die Induktionsverluste Null, und es entstehen im Mantel nur noch Wirbelstromverluste in der Grössenordnung von 1% der Leiterverluste.

Für Wanderwellen verhalten sich Kabel ohne beidseitige Mantelerdung wie zwei unabhängige Wellenleiter. Der Wellenwiderstand zwischen Mantel und Erde kann dabei wesentlich grösser sein als der zwischen Leiter und Mantel. Nach [9] kann deshalb der Mantel auf der ungeerdeten Seite bis zu 50% der Spannungsamplitude der einlaufenden Überspannung auf dem Innenleiter annehmen. Die Mantelisolation ist dieser Überspannungsbelastung nicht gewachsen. Es können kurzzeitige Überschläge zwischen Mantel und Erde auftreten, welche die äussere Isolation des Mantels beschädigen. Daher ist es notwendig, den Kabelmantel auf der ungeerdeten Seite mit einem Ableiter zu schützen (Fig. 9a). Für die Dimensionierung dieser Ableiter gelten folgende Überlegungen:

Die dauernd zwischen Kabelmantel und Erde anliegende 50-Hz-Spannung, also die induzierte Spannung bei Nennbetrieb des Kabels, ist relativ klein. Sie wird unter 500 V liegen und spielt für die Dimensionierung keine Rolle. Im Kurzschlussfall, d.h. bei Kurzschlussstrom im Kabelleiter, wird jedoch eine Spannung von mehreren kV am ungeerdeten Ende des Mantels und damit auch am Ableiter auftreten. Die Dauer dieser temporären Überspannung entspricht der Abschaltzeit des Kurzschlussstromes. Ein Ableiter mit Funkenstrecken ist auf diese Spannung auszulegen. Er darf keinesfalls zünden, weil er keinen 50-Hz-Strom über mehrere Perioden führen kann. Sein Schutzniveau ist deshalb relativ hoch. - Ein funkenstreckenloser Ableiter mit Metalloxid-(M.O.-)Widerständen verhält sich in dieser Beziehung wesentlich günstiger. Dies dank seiner Festigkeit gegenüber temporären Überspannungen für die Kurzschlussdauer. Seine Dauerbetriebsspannung muss daher nur auf etwa 75% der 50-Hz-Spannung zwischen Mantel und Erde ausgelegt sein. Bei einem so dimensionierten M.O.-Ableiter erhält man nicht nur ein tieferes Schutzniveau, sondern auch ausreichende Sicherheit gegen thermische Überlastung. Figur 10 zeigt eine komplette Ableiterreihe, die in M.O.-Technik ausgeführt ist und sich besonders gut für den Kabelmantelschutz eignet.

Bei grösseren Kabellängen ist es nötig, die Kabelmäntel zu unterteilen. Die Ableiter werden dann nach Figur 9b angeordnet.

Sofern es bei grossen Kabellängen möglich ist, die Kabelstrecke in drei gleich grosse Abschnitte zu unterteilen, so wird auch die Methode des Auskreuzens (Crossbonding) nach Figur 9c angewendet. Die Ableiter für den Kabelmantelschutz können an den beiden Kreuzungsstellen montiert werden.

Literatur

[1] *K. Berger:* Resultate der Blitzmessungen der Jahre 1947...1954 auf dem Monte San Salvatore. Bull. Schweiz. Elektrotechn. Ver. Bd. 46(1955), Nr. 9, S. 405...424.

[2] *R.B. Anderson* and *A.J. Eriksson:* A summary of lightning Parameters for Engineering Applications. Cigre Report 33-06 (1980).

[3] *M. Christoffel:* Der Einfluss von Kabelstrecken auf die Überspannungsvorgänge in Übertragungsnetzen mittlerer und hoher Spannung, Brown-Boveri-Mitteilungen 51(1964)6, S. 369.

[4] *W. Frey* und *P. Althammer:* Die Berechnung von elektromagnetischen Ausgleichsvorgängen auf Leitungen mit Hilfe eines Digitalrechners. Brown-Boveri-Mitteilungen, 48(1961), S. 344...355.

[5] *M. Christoffel, E. Fischer* und *G. Hosemann:* Überspannungsschutz von Transformatoren mit direkt eingeführtem Kabel bei Blitzeinschlag in die vorgelagerte Freileitung. Elektrotech. Z. Ausg. A. Bd 83(1962), Nr. 23, S. 761...772.

[6] *F. Schwab:* Blitzsichere Freileitungen. Bull. SEV 55(1964)3, S. 87...90.

[7] *U. Burger:* Überspannungsableiter und Funkenstrecke als Schutz von Transformatoren mit direkt eingeführtem Kabel. Bulletin SEV 57(1966)26, S. 1211...1220.

[8] *E. Vogelsanger* et al: Die Isolationskoordination auf Freileitungen. Bulletin SEV/VSE 74(1983)7, 2. April, S. 342...349.

[9] *D.J. Skipper:* The design of specially bondet cable circuits (Part II). Electra No. 47, S. 61...86, June/July 1976.

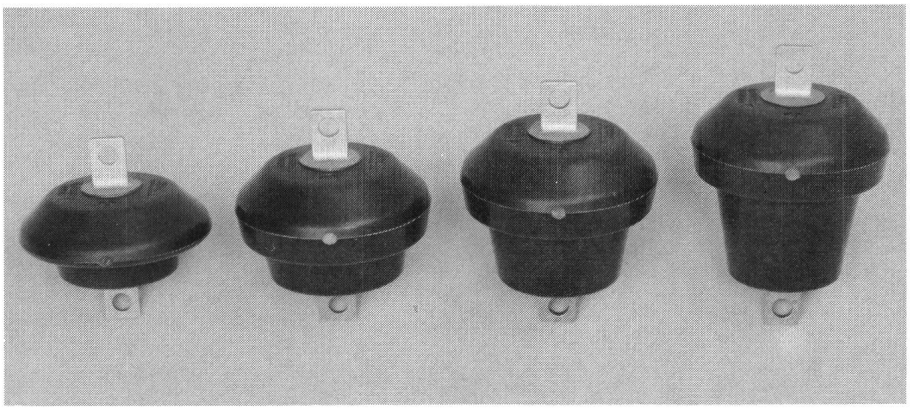


Fig. 10 Überspannungsableiter für Kabelmantelschutz. BBC-Typenreihe MVR 1 bis MVR 6,6